

УДК 662.767.2

## ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ БИОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

П.Ф. Богданович, Д.А. Григорьев, В.В. Заневский

УО «Гродненский государственный аграрный университет»,  
г. Гродно, Республика Беларусь

(Поступила в редакцию 12.06.2012 г.)

*Аннотация.* Поскольку разложение органических отходов происходит за счет деятельности определенных типов бактерий, существуют определенные требования и к сырью: оно должно быть подходящим для развития бактерий, содержать биологически разлагающееся органическое вещество и в большом количестве воду (90-94%). Желательно, чтобы среда была нейтральной и без веществ, мешающих действию бактерий: например, мыла, стиральных порошков, антибиотиков. При этом биогаз непосредственно может быть эффективно использован только в качестве топлива для систем теплоснабжения, а в качестве моторного топлива целесообразнее использовать не биогаз, а получаемый из него очищенный биометан (94-98% СН<sub>4</sub>) без углекислого газа и других примесей. Получить биометан можно путем химической очистки биогаза с помощью щелочного раствора, регенерируемого электро-

химическим способом. Получаемые реагенты могут частично использоваться для стабилизации уровня pH исходного сырья.

*Summary.* Since decomposition organic departure occurs to account of activity of the certain types bacteria, exist the certain requirements and to сырью: it must be suiting for development bacteria, contain biologically decaying organic material and in good supply water (90-94%). Advisable that ambience was neutral and without material, disturbing action bacteria: for instance, soaps, soap powders, antibiotic. Herewith, biobut directly can be is effectively used only as fuel for systems fuel warmth, but as motor fuel reasonable to use not biobut, but got from it refined biomethane (94-98%  $\text{CH}_4$ ) without carbon dioxide and other admixtures. Get ethane possible way chemical peelings biomethane by means of alkaline solution, regenerated electric chemistry way. The Got reagents can be partly used for stabilization level pH source cheese.

**Введение.** Биоэнергетическая установка включает два основных элемента – биогазовую установку, продуцирующую биогаз, и когенерационную установку, производящую тепловую и электрическую энергию за счет биогаза. Разложение органических отходов в метантенке биогазовой установки происходит за счет деятельности определенных типов бактерий, что налагает соответствующие требования и к сырью: оно должно быть подходящим для развития бактерий по химическому составу, содержать биологически разлагающееся органическое вещество и в большом количестве воду (90-94%). Необходимо, чтобы среда была нейтральной ( $\text{pH} \approx 7$ ) и без веществ, мешающих действию бактерий, например, моющих и дезинфицирующих составов, антибиотиков. При этом получаемый биогаз, содержащий от 30 до 50% примесей ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}$  и др.), может быть эффективно использован в качестве топлива только в котельных систем теплоснабжения. В качестве моторного топлива для когенерационной установки целесообразно использовать не биогаз, а получаемый из него очищенный биометан (94-98%  $\text{CH}_4$ ) без углекислого газа и других примесей.

**Цель работы:** определить возможность использования электрохимического метода для оптимизации работы биоэнергетической установки.

**Материал и методика исследований.** Биоэнергетическая установка в настоящее время является характерным элементом современного безотходного производства во многих областях сельского хозяйства и пищевой промышленности. Если на предприятии есть отходы сельского хозяйства или пищевой промышленности, появляется реальная возможность с помощью биогазовой технологии не только значительно сократить расходы на потребляемые энергоносители, но и повысить эффективность предприятия, получив дополнительную прибыль.

Перечень органических отходов, пригодных для производства биогаза, очень широкий: навоз, птичий помёт, зерновая и меласная

послеспиртовая барда, пивная дробина, свекольный жом, фекальные осадки, отходы рыбного и забойного цеха (кровь, жир, кишки, каньга), трава, бытовые отходы, отходы молокозаводов – соленая и сладкая молочная сыворотка, отходы производства биодизеля – технический глицерин от производства биодизеля из рапса, отходы от производства соков – жом фруктовый, ягодный, овощной, виноградная выжимка, водоросли, отходы производства крахмала и патоки – мезга и сироп, отходы переработки картофеля, производства чипсов – очистки, гнилые клубни и другие отходы.

Кроме отходов биогаз производят из специально выращенных энергетических культур, например, из силосной кукурузы или других культур.

В процессе сбраживания сырья в биогазовых установках бактерии, производящие метан, разлагают органическое вещество и формируют продукты разложения в виде биогаза и других компонентов. В принципе, все органические вещества подвержены процессам брожения и разложения. Однако в простых биогазовых установках предпочтительно перерабатывать только однородные и жидкие органические отходы – навоз и стоки скота, свиней и помет птиц.

В более совершенных биогазовых установках перерабатывают и другие виды органических отходов – растительные остатки и твердые мусорные отходы. Объем вырабатываемого биогаза зависит от типа используемого сырья, его химического состава и температуры процесса сбраживания.

В первую очередь выход биогаза зависит от содержания сухого вещества и вида используемого сырья. Из одной тонны навоза крупного рогатого скота получается 50-65 м<sup>3</sup> биогаза с содержанием метана 60%, 150-500 м<sup>3</sup> биогаза из различных видов растений с содержанием метана до 70%. Максимальное количество биогаза – это 1300 м<sup>3</sup> с содержанием метана до 87% – можно получить из жира.

Различают теоретический (физически возможный) и технически реализуемый выход газа. В 1950-70-х гг. технически возможный выход газа составлял всего 20-30% от теоретического. Сегодня применение энзимов, бустеров для искусственной деградации сырья (например, ультразвуковых или жидкостных кавитаторов) и других приспособлений при оптимальных параметрах (химическом составе, температуре и продолжительности процесса) позволяет увеличивать выход биогаза на самой обычно установке с 60% до 95% [1].

**Температурный режим и время брожения.** Процесс брожения очень чувствителен к изменениям температуры. Степень этой чувствительности, в свою очередь, зависит от температурных рамок, в

которых происходит переработка сырья. При процессе ферментации могут быть допустимы изменения температуры в пределах:

- психрофильный температурный режим:  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  в час;
- мезофильный температурный режим:  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  в час;
- термофильный температурный режим:  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  в час.

На практике более распространены два температурных режима - термофильный и мезофильный. У каждого из них есть свои достоинства и недостатки. Преимущества термофильного процесса сбраживания - это повышенная скорость разложения сырья и, следовательно, более высокий выход биогаза при практически полном уничтожении болезнетворных бактерий, содержащихся в сырье. К недостаткам термофильного разложения можно отнести: большое количество энергии, требуемое на подогрев сырья в реакторе, чувствительность процесса сбраживания к минимальным изменениям температуры и несколько более низкое качество получаемых биоудобрений.

При мезофильном режиме сбраживания сохраняется высокий аминокислотный состав биоудобрений, но обеззараживание сырья не такое полное, как при термофильном режиме.

Техническое обеспечение выбранного температурного режима не представляет затруднений. В качестве источника тепловой энергии используются котельная или когенерационная установка, производящая тепловую и электрическую энергию.

Время сбраживания для систем с непрерывной загрузкой определяется отношением объема реактора к ежедневному объему загружаемого сырья. На практике время оборота реактора выбирают в зависимости от температуры сбраживания и состава сырья в следующих интервалах:

- психрофильный температурный режим: от 30 до 40 и более суток;
- мезофильный температурный режим: от 10 до 20 суток;
- термофильный температурный режим: от 5 до 10 суток.

Суточная доза загрузки сырья определяется временем оборота реактора и увеличивается (как и выход биогаза) с увеличением температуры в реакторе. Если время оборота реактора составляет 10 суток, то суточная доля загрузки будет составлять 1/10 от общего объема загружаемого сырья. Если время оборота реактора составляет 20 суток, то суточная доля загрузки будет составлять 1/20 от общего объема загружаемого сырья. Для установок, работающих в термофильном режиме, доля загрузки может составить до 1/5 от общего объема загрузки реактора.

Выбор времени сбраживания зависит также и от типа перерабатываемого сырья. Для основных видов сырья, перерабатываемого в условиях мезофильного температурного режима, время, за которое выделяется наибольшая часть биогаза, равно, примерно:

- жидкий навоз КРС – 10-15 дней;
- жидкий свиной навоз – 9-12 дней;
- жидкий куриный помет – 10-15 дней;
- навоз, смешанный с растительными отходами – 40-80 дней.

Разброс во времени обусловлен неоптимальностью химического состава сырья и прежде всего значением кислотно-щелочного баланса [2].

**Оптимизация химического состава.** Для роста и жизнедеятельности метановых бактерий (с помощью которых производится биогаз) необходимо наличие в сырье органических и минеральных питательных веществ. В дополнение к углероду и водороду создание биоудобрений требует достаточного количества азота, серы, фосфора, калия, кальция и магния и некоторого количества микроэлементов – железа, марганца, молибдена, цинка, кобальта, селена, вольфрама, никеля и других. Обычное органическое сырье – навоз животных – содержит достаточное количество вышеупомянутых элементов.

Микроорганизмы нуждаются как в азоте, так и в углероде для ассимиляции в их клеточную структуру. Различные эксперименты показали: выход биогаза наибольший при уровне соотношения углерода и азота от 10 до 20, где оптимум колеблется в зависимости от типа сырья. Для достижения высокой продукции биогаза практикуется смешивание сырья для образования оптимального соотношения C/N. Кроме того, необходимо поддерживать определенную влажность сбраживаемого в метантенке субстрата (обычно около 90%).

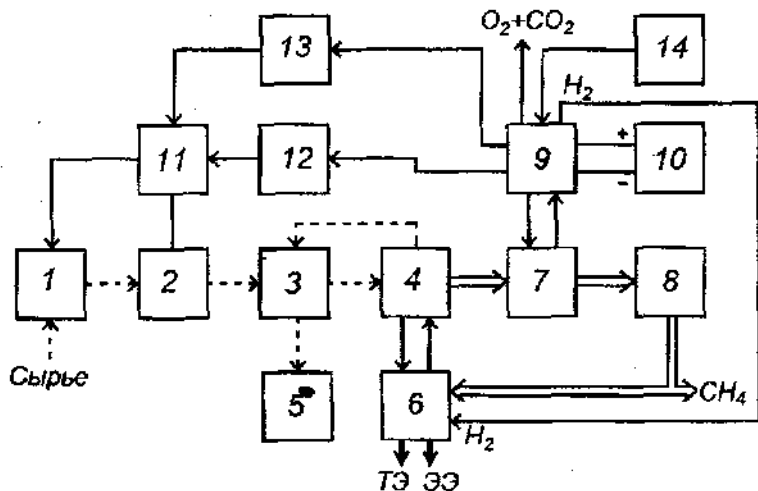
Очень важное значение для процесса брожения имеет значение pH сырья, оптимальное значение которого находится в пределах 6,7-7,6. Для различных видов сырья это значение различно. Так, если для навоза pH = 6,5, то для растительных отходов pH = 7,3. При этом уровень pH свиного навоза несколько ниже, чем навоза скота, в то время как куриный помет имеет самый высокий уровень pH (содержит мел).

Метанопродуцирующие бактерии лучше всего приспособлены для существования в нейтральных или слегка щелочных условиях. В процессе метанового брожения второй этап производства биогаза является фазой активного действия кислотных бактерий. В это время уровень pH снижается, то есть среда становится более кислой. Однако при нормальном ходе процесса жизнедеятельность разных групп бактерий в реакторе проходит одинаково эффективно и кислоты перерабатываются метановыми бактериями.

При эксплуатации биогазовых установок необходимо проводить контроль за показателем pH исходного сырья. На практике регулирование этого показателя осуществляется путем добавления извести, что

технически не всегда оправдано. Кроме того, данный способ не позволяет понижать уровень pH сырья.

**Структура биоэнергетической установки.** На рисунке представлена структурная схема биоэнергетической установки, обеспечивающей оптимизацию процесса получения биогаза и его очистку от примесей электрохимическим способом.



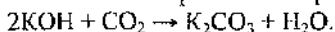
Структурная схема биоэнергетической установки:

- 1 – гомогенизатор; 2 – анализатор pH; 3 – теплообменник; 4 – метан-тенк;  
 5 – хранилище остатка; 6 – когенерационная установка; 7 – абсорбер;  
 8 – газгольдер; 9 – электролизер; 10 – блок питания; 11 – блок коррекции pH;  
 12 – накопитель раствора с pH < 7; 13 – накопитель раствора с pH > 7;  
 14 – блок подготовки электролита.

Функционирование установки происходит следующим образом. Исходное сырье подается на подготовку в гомогенизатор 1, где измельчается, перемешивается и доводится до требуемой влажности. Подготовленное таким образом сырье через анализатор 2 pH и теплообменник 3 загружается в метантенк 4, где подвергается сбраживающей. Одновременно с загрузкой из метантенка идет отбор отработанного сырья – остатка, который через теплообменник 3 уходит в хранилище 5 остатка. В теплообменнике за счет процесса рекуперации тепловой энергии осуществляется подогрев закачиваемого в метантенк исходного сырья. Окончательный его подогрев и поддержание оптимального температурного режима в метантенке осуществляется за счет тепловой энергии, вырабатываемой когенерационной установкой 6.

В процессе брожения в метантенке образуется биогаз, представляющий собой смесь метана  $\text{CH}_4$ , углекислого газа  $\text{CO}_2$  и других газов. С выхода метантенка биогаз подается на газовый вход абсорбера 7, где очищается до состояния метана. Абсорбер выполнен в виде цилиндрической емкости, в которой циркулирует абсорбент – водный раствор щелочи, например  $\text{KOH}$ . Через этот раствор барботируется биогаз.

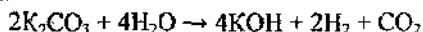
В процессе взаимодействия биогаза и абсорбента происходит реакция поглощения углекислого газа и образования карбоната калия, то есть



Со щелочью будут также реагировать и другие примеси, содержащиеся в биогазе.

С газового выхода абсорбера очищенный биометан поступает в газгольдер 8, где накапливается и затем используется в качестве топлива для когенерационной установки 6 и на другие нужды.

Регенерация абсорбента осуществляется путем его обработки в диафрагменном электролизере 9, электрическое питание которого обеспечивает блок питания 10. При этом абсорбент с жидкостного выхода абсорбера поступает на жидкостный вход электролизера, где происходит процесс восстановления гидроокиси калия из карбоната калия с одновременным образованием свободного водорода, кислорода и углекислого газа.



Восстановленный щелочной раствор с катодной области электролизера подается на жидкостный вход абсорбера. Так осуществляется циркуляция абсорбента через абсорбер [3].

В процессе работы абсорбера в абсорбенте, кроме карбоната, накапливаются другие примеси, загрязняющие абсорбент. Уменьшение концентрации этих примесей обеспечивается путем отбора некоторой части католита (раствора с  $\text{pH} > 7$ ) и анолита (раствора с  $\text{pH} < 7$ ) из электролизера и подачи в накопитель 12 раствора с  $\text{pH} < 7$  и в накопитель 13 раствора с  $\text{pH} > 7$ , выходами, связанными с жидкостными входами блока 11 коррекции  $\text{pH}$ . Пополнение количества абсорбента осуществляется за счет подачи в электролизер водного раствора  $\text{KOH}$  из блока 14 подготовки электролита.

Коррекция кислотно-щелочного баланса исходного сырья в метантенке осуществляется путем подачи в гомогенизатор 1 кислотного либо щелочного растворов с выхода блока 11 коррекции  $\text{pH}$ , поступивших на его жидкостные входы. Удельный расход этих растворов будет сравнительно небольшим – от 0,3 до 1,0  $\text{дм}^3$  на 1  $\text{м}^3$  исходного субстрата при колебаниях уровня  $\text{pH}$  от 5,5 до 8,5. При этом, как показано при работе электротехнологической установки на свиноводческом

комплексе «Орковичи» (Новогрудский район, Гродненская область), энергозатратность производства корректирующих растворов будет в пределах 2...5 кВтч/м<sup>3</sup> [4].

Управление процессом коррекции происходит по сигналу с выхода анализатора 2, поступающему на электрический вход блока 11. Алгоритм управления процессом коррекции рН сырья будет иметь вид:

$$\Delta pH \rightarrow 0,$$

где  $\Delta pH = 7 - pH_c$  — разность между заданным значением рН нейтральной среды ( $pH = 7$ ) и значением рН исходного сырья  $pH_c$ . Элементы контура управления — гомогенизатор как объект управления, анализатор рН и блок коррекции рН могут быть представлены как инерционные звенья с постоянными времени  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  и  $\tau_{11}$  соответственно и описаны передаточными функциями [5]:

$$K_1(p) = \frac{K_1}{\tau_1 p + 1}, \quad K_2(p) = \frac{K_2}{\tau_2 p + 1}, \quad K_{11}(p) = \frac{K_{11}}{\tau_{11} p + 1},$$

где  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_{11}$  — коэффициенты передачи гомогенизатора, анализатора рН и блока коррекции рН.

Учитывая, что  $\tau_{11} \ll \tau_1$  и  $\tau_2 \ll \tau_1$ , коэффициент передачи  $K(p)$  кислотно-щелочного баланса исходного сырья в гомогенизаторе будет иметь вид:

$$K(p) = \frac{K_1 K_{11}}{\tau_1 p + K_1 K_2 K_{11} + 1}.$$

Согласно выражению  $K(p)$  данная система автоматического регулирования является аperiodической системой первого порядка. Скорость и точность коррекции значения рН на входе метантенка будет определяться значением постоянной времени  $\tau_1$  гомогенизатора биогазовой установки.

**Результаты исследований и их обсуждение.** При анаэробном сбраживании органических материалов — отходов животноводства, растительных остатков и отходов предприятий пищевых производств, основным критерием, характеризующим эффективность процесса при выбранном температурном режиме метантенка биогазовой установки, является выход биогаза. Максимального значения этот показатель достигает при соблюдении оптимальных условий протекания процесса брожения, к которым относятся: поддержание выбранной температуры в метантенке с точностью  $\pm 1^\circ\text{C}$ ; обеспечение необходимого времени брожения, соответствующего выбранному температурному режиму; поддержание заданного уровня влажности подаваемого в метантенк субстрата и обеспечение кислотно-щелочного баланса исходного сырья в метантенке на уровне, близком к нейтральному.

Названные условия, за исключением условия поддержания значения рН  $\approx 7$  подаваемого в метантенк субстрата, технически хорошо



отработаны и достаточно просто реализуются в действующих биогазовых установках. Сложность обеспечения необходимого кислотно-щелочного баланса исходного сырья обусловлена химической неоднородностью органосодержащих отходов, поступающих на переработку. Поддержание кислотно-щелочного баланса исходного сырья на оптимальном уровне можно обеспечить в биоэнергетической установке, в которой используется электрохимический метод очистки биогаза. Для этой цели предлагается использовать контур автоматического регулирования уровня pH исходного субстрата, включающий гомогенизатор как объект управления, анализатор pH и блок коррекции pH, осуществляющий коррекцию кислотно-щелочного баланса исходного сырья путем подачи в гомогенизатор анолита либо католита, вырабатываемого в электролизере.

**Заключение.** На основе полученных результатов можно утверждать, что биоэнергетическая установка, в которой за счет электрохимической сепарации биогаза получают биометан высокой степени чистоты, при введении контура автоматического регулирования уровня pH исходного субстрата позволяет обеспечить необходимое значение pH за счет использования анолита и католита, вырабатываемых в электролизере;

Автоматическое поддержание заданного уровня pH исходного субстрата обеспечивает оптимизацию анаэробного процесса в метантенке биогазовой установки, увеличивает выход биометана и повышает эффективность биоэнергетической установки в целом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Оптимизация процесса получения биогаза  
[www.bioenergetics.ru/4/parametri\\_i\\_optimizacija\\_sbragivaniya.html](http://www.bioenergetics.ru/4/parametri_i_optimizacija_sbragivaniya.html)
2. Обезвреживание и использование отходов птицеводства  
<http://www.uberegmirusor.ru/index.php?page=content&subpage=s&r=24&p=84&s=75>
3. Биоэнергетическая установка: пат. 2145 Респ. Беларусь / П.Ф.Богданович, П.П.Богданович, Н.А.Глушенко [и др.] // Официальный бюллетень «Вынаходствы, карысныя мадэлі, прамысловыя узоры». – 1998. – №2. С.120-121.
4. Разработать и внедрить в производство электротехнологическое оборудование, обеспечивающее подготовку воды для поения и приготовления влажных кормовых смесей для свиней на свиноводческих комплексах Гродненской области. отчет о НИР (заключит.): / ГГАУ; рук. Григорьев Д.А. – Гродно, 2008. – 40с. – Исполн. Григорьев Д.А., Богданович П.Ф., Заневский В.В., Меленц Н.В. – № ГР 20081775. – Инв. № 04/7.
5. Автоматика, автоматизация и АСУТП: учебное пособие для студентов инженерно-технологического факультета / П.Ф.Богданович, – Гродно: ГГАУ, 2009 – 128 с.